

На правах рукописи

СМЕЛОВ Виталий Геннадиевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭХО ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД
НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДГОТОВКИ
ПРОИЗВОДСТВА

Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Самара 2007

Работа выполнена на производства двигателей летательных аппаратов в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева»

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Шитарев И.Л.

Официальные оппоненты: член-корр. РАН, д-р техн. наук, проф.
Барвинок Виталий Алексеевич, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении

Канд. техн. наук, доц.
Зарипов Риф Акрамович, доцент кафедры технологии машиностроения ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Ведущая организация – «Самарский научно-технический комплекс
им. Н.Д. Кузнецова».

Защита состоится «28» сентября 2007г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.02 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева».

Автореферат разослан «24» августа 2007г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



В.Н. Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Лопатки компрессора являются одними из наиболее сложных и ответственных деталей газотурбинного двигателя (ГТД), определяющими и его ресурс, и надежность работы. Они характеризуются сложной пространственной формой, малой жесткостью, высокими требованиями по точности геометрических параметров, качеству поверхностного слоя. Производство таких лопаток в настоящее время осуществляется с применением малопрпусковых заготовок. Однако из-за малой жесткости лопаток, отсутствия развитых поверхностей для точного базирования наиболее эффективным, а в некоторых случаях и единственным методом становится применение электрохимической обработки (ЭХО) пера лопаток.

Общая методика технологической подготовки (ТП) ЭХО является многоуровневой задачей и предполагает последовательное выполнение стандартных этапов проектирования: технологический анализ чертежа детали; выбор способа и схемы обработки; выбор рабочей жидкости; формирование структуры электрохимического этапа ТП или структуры операции ЭХО; определение параметров режима обработки: геометрические параметры (минимальный межэлектродный зазор (МЭЗ) a_0 , максимальная длина гидравлического тракта $L_{г\tau}$, величина хода электрод инструмента (ЭИ) L_x), кинематические параметры ($V_k=V_k(t)$), электрические параметры (напряжения на электродах U , величина тока I , амплитудные значения U_a , I_a , длительность импульса τ и паузы $\tau_{п}$, скважность q), гидравлические параметры (давление на входе $P_{вх}$ и выходе $P_{вых}$ МЭЗ, средняя скорость V_s или расход Q , электролита); выбор технологического оборудования; проектирование оснастки и инструмента; определение операционных припусков, размеров и допусков; нормирование операций ЭХО; технико-экономическая оценка спроектированного ТП; составление технологической документации.

Наиболее трудоемким этапом подготовки производства является определение оптимальных режимов обработки, а также экспериментальная отработка ТП в производственных условиях, при этом в 2-3 раза увеличивается себестоимость изготовления опытной партии. В данной работе предлагается методика компьютерного моделирования процесса электрохимической обработки пера лопатки с целью снижения затрат, а также повышения качества отработки ТП ЭХО, за счет оптимизации технологических режимов операции. Представленная методика в отличие от существующих включает частные математические модели процессов, соответствующих электрохимическому формообразованию пера и явлений, вызывающих его отклонение от номинального положения: нагрев технологическим током и деформирование пера силовыми факторами, что является актуальным.

Цель работы

Совершенствование методики проектирования технологии ЭХО на основе использования компьютерного моделирования параметров процесса и повышение эффективности обработки ТП на этой основе.

Основные задачи исследования

1. Разработать модель высокого уровня для анализа влияния термоупругих деформаций на точность ЭХО.
2. Создать методику моделирования гидродинамики потока электролита в межэлектродном зазоре для учета влияния перераспределения давлений на точность обработки пера лопатки при ЭХО.
3. Разработать методику моделирования деформации пера при удалении припуска с локализованными в нем остаточными напряжениями при ЭХО.
4. Экспериментально подтвердить адекватность разработанных методик и моделей.
5. Разработать теоретико-экспериментальную модель процесса электрохимического формообразования пера лопаток при импульсной ЭХО, позволяющую рассчитать технологические характеристики точности обработки при изменении режимов.
6. Разработать методику проектирования операции импульсной ЭХО и программное приложение технологов ЭХО «АРМ технолога ЭХО». Реализовать разработанные методики и приложение «АРМ технолога ЭХО» в производственных условиях.

Методы исследований

Общий подход к решению проблемы базируется на системном анализе и математическом моделировании процесса электрохимической обработки и сопутствующих ему явлений. Для решения поставленных задач использовались теоретические и экспериментальные методы исследования динамики температурного поля пера лопатки в процессе ЭХО, метод конечных элементов (МКЭ), общая теория деформирования тел, теория течения жидкостей, теория диффузии в твердом теле. При проведении исследований использовались теория научного эксперимента, включающая отсеивающие эксперименты по методу случайного баланса, уточняющие однофакторные опыты; средства измерительной техники.

Экспериментальные исследования проводились в ОНИЛ-12 Самарского государственного аэрокосмического университета, а также в производственных условиях предприятия – ОАО «Моторостроитель», г. Самара.

Достоверность полученных результатов и правомерность принятых допущений подтверждены экспериментальными данными, обработка которых осуществлялась в соответствии с ГОСТ 8.207.

Научная новизна

Разработан алгоритм моделирования деформации лопаток под действием термоупругих напряжений с использованием МКЭ.

Разработан алгоритм моделирования деформации деталей под действием гидравлических сил, возникающих на операции ЭХО.

Разработан алгоритм моделирования определения деформации лопаток при удалении напряженных слоев на операции ЭХО с использованием осредненных эпюр остаточных напряжений и МКЭ.

Разработана методика проектирования операции импульсной ЭХО, позволяющая сформулировать требования к заготовке, режимам обработки и существенно снизить время и затраты на отработку технологии импульсной ЭХО.

Разработана компьютерная модель объемного формообразования пера лопатки при импульсной ЭХО, позволяющая определить изменение геометрии заготовки по всем заданным в рабочем чертеже точкам профиля.

Практическая ценность

На основе использования полученных разработок создан комплекс программных продуктов («АРМ технолога ЭХО»), позволяющих осуществить научно обоснованное многовариантное проектирование технологии ЭХО пера лопаток ГТД.

Реализация результатов работы

Разработана методика моделирования процесса импульсной ЭХО, которая используется в производстве на ОАО «Моторостроитель» и ОАО «СНТК им. Н.Д. Кузнецова» при проектировании ТП ЭХО.

Вышеуказанная методика и созданное на ее основе программное обеспечение, результаты теоретических и обобщенных экспериментальных исследований, методика быстрого определения деформации деталей под действием термоупругих напряжений с использованием МКЭ, методика быстрого определения деформации деталей под действием гидравлических сил с использованием МКЭ, методика быстрого определения деформации деталей при удалении напряженных слоев с использованием осредненных эпюр остаточных напряжений и МКЭ используются при курсовом и дипломном проектировании студентов специальностей 160301, 160302.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на международных технических конференциях: «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2003, 2006), 5-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» 2006 (Москва, 2006), на ежегодных всероссийских научно-технических конференциях «Королевские чтения» СГАУ.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ и 2 учебных пособия.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и приложений, в совокупности изложенных на 170 страницах машинописного текста, содержит 127 рисунков, 13 таблиц и 4 приложения. Список использованных источников включает 124 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, ее практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации подробно рассмотрены публикации по проблемам совершенствования технологии электрохимической обработки. Наиболее важной задачей при ЭХО лопаток является повышение точности всех геометрических характеристик. Этими вопросами занимались исследователи большого числа организаций в нашей стране, а также зарубежные ученые. Были проанализированы работы специалистов Тульской и Казанской, Уфимской и Ивановской, Московской и Ленинградской, Воронежской и Кишиневской школ, работы зарубежных ученых и, конечно, ученых Самарской школы. Эти работы охватывают все направления совершенствования ЭХО, а также особенностей

обработки специальных материалов, используемых в авиадвигателестроении: титановых, хромоникелевых сталей и сплавов. Предложены рекомендации по обрабатываемости этих материалов. Литературные исследования проблем ЭХО показали значимость следующих факторов, влияющих на точность обработки: гидравлического воздействия потока электролита, деформации пера лопатки при нагреве технологическим током, а также деформации лопатки под действием остаточных напряжений.

Однако специфические условия, связанные с гидродинамикой течения электролита в малом зазоре, распределением тепла в сложной технологической системе, влиянием технологической наследственности на точность обработки, изучены недостаточно, что обусловлено ограниченностью экспериментальных возможностей и сложностью процессов, протекающих на поверхностях электродов.

Существующие способы определения основных факторов, влияющих на точность, трудоемки и не могут быть использованы при проектировании операций ЭХО в условиях производства. Основные недостатки известных моделей - это их дискретность, и разнородность, т.е. они не могут синхронизировано описывать динамику каждой из составляющих деформаций в процессе съема. Имеющиеся математические модели и методики во-первых, не вскрывают всех особенностей данного воздействия в процессе двухсторонней ЭХО и формирования соответствующих систематических погрешностей, во-вторых, могут быть использованы специалистами высокой квалификации, в-третьих, связаны со значительными временными затратами, которые сопоставимы со временем при проектировании технологии ЭХО по традиционным методикам.

В современных условиях необходимо резко сократить время, затрачиваемое на подготовку производства новых лопаток. В связи с новыми открывшимися возможностями вычислительной техники и программных комплексов, использующих численные методы для расчетов, актуальным становится совершенствование методики проектирования технологии ЭХО с использованием моделирования параметров, влияющих на точность обработки при формировании трактовых поверхностей лопаток ГТД.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приведены экспериментальные и теоретические исследования закономерностей возникновения термоупругих деформаций в процессе обработки, разработана методика моделирования термоупругих деформаций, адекватная экспериментальным исследованиям, проанализированы результаты расчетов по данной методике деформаций, возникающих при ЭХО лопаток ротора и статора компрессора.

В соответствии с поставленными задачами на первом этапе работы с целью выявления закономерности деформаций лопаток при нагреве технологическим током нами были проведены экспериментальные исследования на лабораторных установках и образцах (рис.1), разработанных в ОНИЛ 12. Были получены зависимости тепловых и суммарных деформаций образцов при обработке импульсным током на различных плотностях тока при постоянном зазоре и давлении электролита на входе в зазор (рис.2, 3).

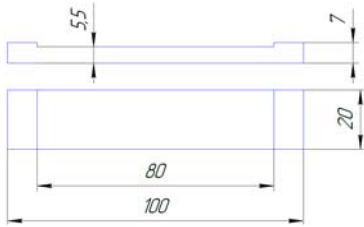


Рис. 1. Образец для проведения исследований

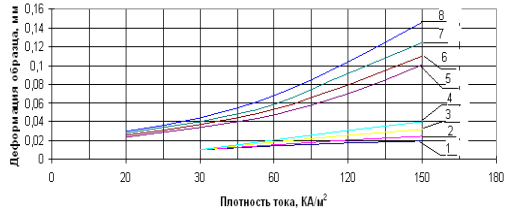


Рис.2. Зависимости деформаций образца от плотности тока при зазоре $a=0,4$ мм: 1, 2, 3, 4 - тепловые деформации, 5, 6, 7, 8 - суммарные деформации при давлениях на входе соответственно $P_{вх}=0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ МПа.

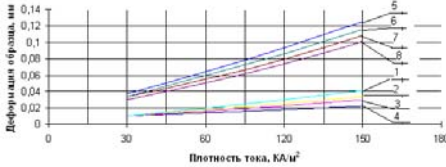


Рис. 3. Зависимости деформаций образца от плотности тока при давлении на входе $P_{вх}=0,4$ МПа: 1, 2, 3, 4 - тепловые деформации; 5, 6, 7, 8 - суммарные деформации при зазорах соответственно $a=0,1; 0,2; 0,4; 0,6$ мм

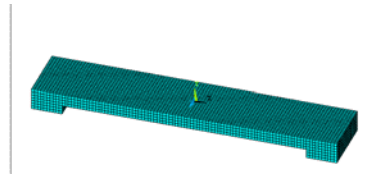


Рис. 4. Образец в ПК Ansys. Наложение сетки конечных элементов

Отработка технологии ЭХО на экспериментальных образцах и полупромышленных установках в современных экономических условиях весьма дорогостояща и трудоемка, поэтому поиск оптимальных режимов ЭХО пера лопаток новых конструкций из новых материалов целесообразно вести с помощью моделирования. В рамках решения этой задачи нами было проведено аналитическое описание процессов, происходящих в образце при проведении данного эксперимента. Аналитически была получена система уравнений распределения температуры в теле произвольного вида, частные решения которой могут быть получены только методом конечных элементов при задании соответствующих граничных условий.

В соответствии с экспериментальными исследованиями проведен анализ распределения температуры образца, возникающий при обработке методом ЭХО, в программном комплексе ANSYS. Используя МКЭ для проведения расчётов на объём образца была наложена упорядоченная «сетка» (рис.4).

Для получения распределения температур в образцах при ЭХО проводился стационарный тепловой анализ: заданы коэффициент теплопроводности (K_{XX} 2т 3,05 (Дж/м·с·к)) и удельная теплоёмкость материала ($C = 460$ (Дж/кг·к)). Образец в процессе ЭХО базируется и закрепляется с двух сторон, токоподвод осуществляется с использованием винтов, поджимающих образец. При протекании электрического тока через образец происходит выделение тепла как в теле образца так и в пятне контакта токоподвода с заготовкой. В свою очередь, на поверхности происходит анодное растворение металла в среде электролита и процесс теплообмена твёрдое тело - жидкость.

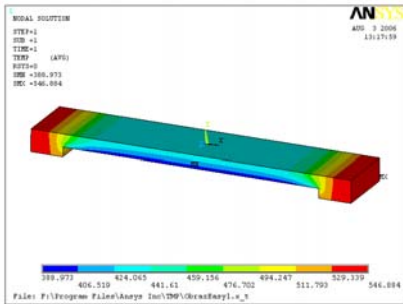


Рис. 5. Распределение температуры в объёме образца при плотности тока - 140 кА/м^2

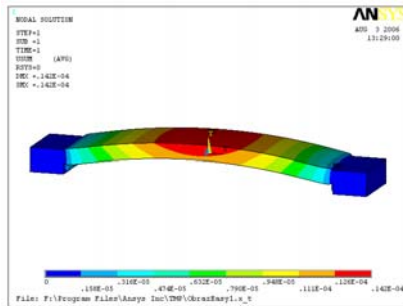


Рис. 6. Деформация образца при тепловой нагрузке, полученной в результате расчета при плотности тока 140 кА/м^2

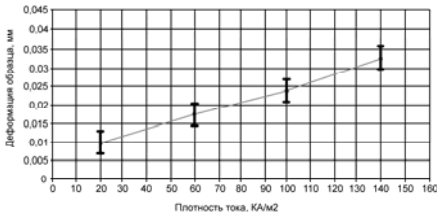


Рис. 7. Зависимость деформаций образца при обработке на различных плотностях тока

При протекании электрического тока через образец происходит выделение тепла как в теле образца так и в пятне контакта токоподвода с заготовкой. В свою очередь, на поверхности происходит анодное растворение металла в среде электролита и процесс теплообмена твёрдое тело - жидкость.

В ПК ANSYS этот процесс можно описать заданием температурной нагрузки по поверхности контакта с электродом, объёмным тепловыделением в образце и конвективным теплообменом по поверхности обработки.

После приложения всех тепловых нагрузок и расчета, (плотность тока 20, 60, 100, 140 кА/м^2) получены следующие результаты (Рис. 5).

Результаты решения тепловой задачи (распределение температуры во всех узлах образца) использовались в качестве исходных данных при решении задачи о деформациях образца. Моделирование термоупругих деформаций заготовок, возникающих при обработке методом ЭХО, осуществлялось МКЭ в программном комплексе ANSYS с использованием математического аппарата теории термоупругих напряжений. В модели были заданы свойства материала: модуль упругости, коэффициент Пуансона (E_{X} $2,15e11$ (Па), ν 0,3.), коэффициент линейного расширения (α_{LX} $11.7e-6$ (1/к)), плотность материала ($DENS$ 7800 (кг/м³)). Поджатие винтами моделировалось заданием поузлового ограничения по всем степеням свободы на соответствующих элементах. Результаты моделирования представлены на рис.6.

После анализа полученных результатов была построена зависимость (рис.7) деформаций образца при обработке на различных плотностях тока, из которой видно, что расчетные значения укладываются в область значе-

ний полученных экспериментально. Таким образом, можно говорить о создании методики моделирования термоупругих деформаций при электрохимической обработке, которая заключается в следующем алгоритме действий (рис.8), состоящем из двух этапов:

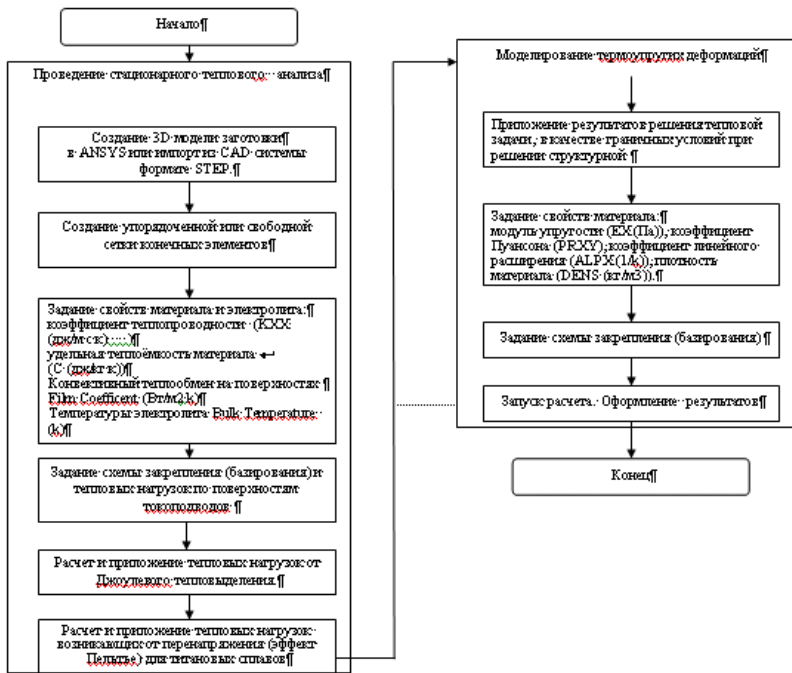


Рис. 8. Алгоритм методики математического моделирования термоупругих деформаций

Разработанная методика позволяет получить результаты, которые соответствуют данным физического эксперимента и обеспечивают высокую эффективность. Она позволяет существенно сократить сроки и стоимость внедрения новых конструкций в производство за счет уменьшения, а в ряде случаев исключения экспериментальных исследований на этапах подготовки производства.

Результаты расчетов термоупругих деформаций по данной методике могут быть использованы при проектировании операции электрохимической обработки заготовок лопаток ГТД. Для количественной оценки возможных тепловых деформаций лопаток на операциях ЭХО по указанной методике был проведен анализ термоупругих деформаций различных по конструкции и габаритам лопаток ротора и статора компрессора двигателя НК 14 СТ. Материал рабочих лопаток - сталь 13X11H2B2MФ, материал лопаток направляющих аппаратов - сталь 15X2H2.

В результате моделирования деформаций лопаток ротора было получено, что максимумы локализованы на входной и выходной кромке на расстоянии 15-30% от высоты лопатки ближе к периферийным сечениям. Полученное распределение деформации по высоте лопатки идет вразрез с существующими представлениями о тепловых деформа-

циях лопатки под действием ЭХО. Эти результаты позволяют выработать рекомендации по коррекции инструмента и способу закрепления.

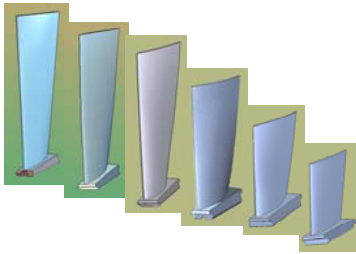


Рис. 9. Лопатки ротора

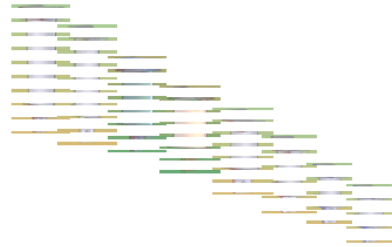


Рис. 10. Лопатки направляющего аппарата

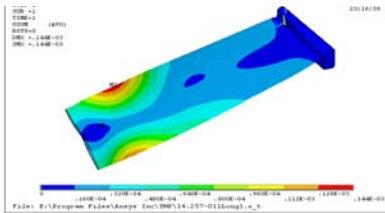


Рис. 11 Результаты расчета деформации лопатки 1 ступени ротора

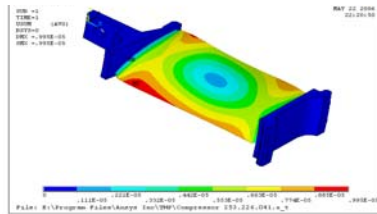


Рис. 12 Результаты расчета деформации лопатки статора 4 ступени

Расчёт лопаток направляющего аппарата показал, что деформации у них значительно меньше, чем у лопаток рабочего колеса. Максимальные деформации наблюдаются на входной и выходной кромках, однако следует отметить, что имеет место два максимума, расположенных на расстоянии 15-20% от втулочного и периферийного сечений.

В третьей главе приведены экспериментальные и теоретические исследования закономерностей гидравлического воздействия потока электролита на заготовку в процессе ЭХО. Проанализированы результаты расчетов по данной методике роторных и статорных лопаток компрессора.

На лабораторных установках и образцах, разработанных в ОНИЛ 12 нами были получены экспериментальные зависимости деформаций образцов в процессе ЭХО. В ходе экспериментов изменялись давление на входе ($P_{вх}$) и выходе из МЭЗ ($P_{вых}$), величина МЭЗ (b) и их неравномерность по обеим сторонам образца ($a_{вх} : a_{вых}$), а также регистрировалась деформация образца от изменения указанных факторов (f) (рис. 14).

Показано, что при постоянной величине $a_{вх} : a_{вых}$ наиболее интенсивный рост деформаций наблюдается в начальный период изменения отношения $a_{вых} : b$, а в дальнейшем деформация растет медленнее. Изменение $a_{вх} : a_{вых}$ при постоянном отношении $a_{вых} : b$ оказывает на величину деформации примерно такое же влияние, как и увеличение соотношения $a_{вых} : b$ при сохранении $a_{вх} : a_{вых}$ постоянным. Как отмечалось ранее, отработку технологии ЭХО целесообразно

вести с помощью математических моделей высокого уровня, адекватно отражающих условия ЭХО.

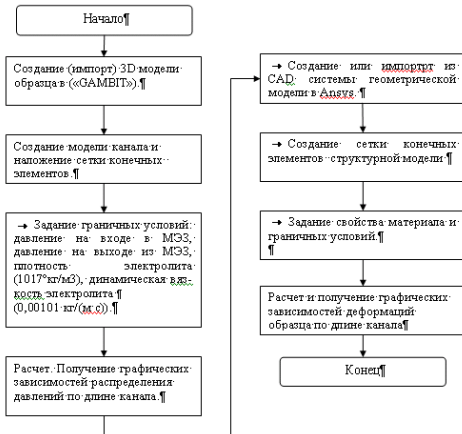


Рис.13. Алгоритм расчета деформаций заготовок возникающих, на операциях ЭХО под действием гидравлических сил

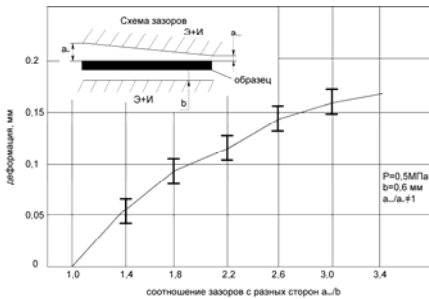


Рис.14 Сравнительная диаграмма деформаций образца f от соотношения зазоров $a_{\text{выб}}/b$

В соответствии с экспериментальными исследованиями была разработана методика математического моделирования гидравлического воздействия потока электролита на лопатку в процессе ЭХО МКЭ, которая заключается 1 алгоритме действий, представленном на рис. 13.

Сопоставляя зависимость, полученную в результате моделирования, и поле рассеивания деформаций образца, полученные экспериментальным путем, видно, что расчетная зависимость (рис. 14) укладывается в область рассеивания значений, полученных экспериментально.

Данная методика адекватна экспериментальным исследованиям, состоит из двух этапов: решение гидравлической задачи осуществляется в программном пакете Fluent, результаты решения гидравлической задачи являются исходными данными при структурном расчёте в ANSYS. Для анализа наиболее часто используемых вариантов гидравлических режимов потока электролита на зазорах, используемых при обработке заготовок лопаток средних ступеней на операции ЭХО, была составлена программа численного эксперимента, которая представлена в таблице 1.

Исследования показали, что в процессе ЭХО при внезапном сужении, расширении или изменении направления потока, когда гидродинамические условия протекания электр

ролита в межэлектродном зазоре приводят к образованию «застойных зон», всякое нарушение равномерности и прямолинейности движения потока связано с потерей напора, изменением скорости потока и, что самое главное, возникновением вихревых областей. При этом изменение условий движения потока приводит как к увеличению интенсивности турбулентности и утолщению пограничного слоя, так и к отрыву потока от стенок и его встречному движению и вихреобразованию, что ведет к значительному возрастанию сопротивления движению электролита.

Программа и результаты исследования

Анализируемые параметры	Перепад давления, атм (диапазон перепада, МПа)	Деформация пера, мм
1. Величина МЭЗ, мм:		
0,15	4 (0,5 – 0,1)	0,029 (0,029)
0,15	4 (0,9 – 0,5)	0,029 (0,029)
0,15	8 (0,9 – 0,1)	0,312
0,25	4 (0,5 – 0,1)	0,022
0,25	3 (0,4 – 0,1)	0,014
2. Неравномерность распределения припуска по перу лопатки:		
а схема – диффузорный канал над спинкой	3 (0,4-0,1)	0,0914
б схема – конфузорный канал над спинкой	4 (0,5-0,1)	0,123
в схема – диффузорный канал над корытцем	4 (0,5-0,1)	0,123
г схема – конфузорный канал над корытцем	3 (0,4-0,1)	0,0983
3. Разворот пера относительно электродов:		
против часовой стрелки	3 (0,4-0,1)	0,130
по часовой стрелке	3 (0,4-0,1)	0,145
4. Схема подачи электролита:		
на входную кромку пера	4 (0,5-0,1)	0,0289
на выходную кромку пера	4 (0,5-0,1)	0,0231
вдоль пера	4 (0,5-0,1)	0

В этих условиях при резком падении скорости и изменении направления движения потока, как показали эксперименты, происходит весьма замедленная эвакуация продуктов анодной реакции из зоны обработки, что, в свою очередь, снижает электропроводность электролита. При помощи полученной методики можно контролировать: скорость электролита в различных областях МЭЗ, при необходимости обеспечения заданной скорости прокачивания, для достижения оптимальных параметров операции и выполнения основных требований, предъявляемых к электролиту; равномерность распределения давления по МЭЗ для анализа стабильности протекания процесса ЭХО; наличие так называемых «вихрей» и образование «застойных зон» при обработке заготовок лопаток на операции ЭХО.

Методика позволяет определять возможные деформации заготовки от гидродинамических сил в соответствии с режимами обработки, а также свести к минимуму брак, определить допустимый минимальный зазор на операции ЭХО и возможность применения операции на окончательном этапе обработки с наивысшими показателями производительности и качества.

В четвертой главе диссертации приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния наследственных остаточных напряжений (о.н.) на формообразование в процессе ЭХО, с целью получения взаимосвязей между технологическими параметрами ЭХО, о.н. в заготовке лопатки перед ЭХО и деформациями пера после обработки.

При этом изучалось влияние различных методов обработки профиля пера на величину остаточной деформации заготовки лопатки, влияние структуры технологического процесса на распределение о.н. в пере лопаток после ЭХО и финишных операций. Здесь же приведена разработанная методика быстрого определения деформаций пера заготовки лопатки при удалении напряженного слоя. Метод общего деформирования слишком сложен для использования на производстве и требует специальной подготовки. В то же время быстрое решение данной задачи требуется при проектировании технологии с учетом технологической наследственности.

В качестве средства создания такой методики были использованы ПК ANSYS и электронная модель пера лопатки, а также экспериментально полученная эпюра активных напряжений (разница между напряжениями до и после съема напряженного слоя). При этом основное отличие предлагаемой нами методики состоит в том, что лопатка нагружается осредненными по глубине удаляемого слоя напряжениями. В работах В.Ф. Павлова доказывается правомерность такой замены в расчетах деформации реально полученной эпюры остаточных напряжений упрощенной осредненной по величине эпюрой, эквивалентной по величине конечной деформации. Модель нагружалась начальными напряжениями (Initial Stress Loading), то есть задавались начальные напряжения, как нагрузка.

Методика определения деформации после удаления слоя материала по перу лопатки с помощью ПК ANSYS 5.7 выглядит следующим образом.

1. Создание электронной модели пера лопатки (или вызывается из базы данных) и разбиение на конечные элементы, например SOLID 45.
2. Задание свойства материала лопатки при температуре ЭХО: модуль упругости (EXX), плотность (DENS); коэффициент Пуассона (NUXY).
3. Вычисление эпюры активных остаточных напряжений (разность между эпюрами до и после анализируемой обработки).
4. Определение осредненной эпюры постоянных по величине в пределах снимаемого слоя напряжений из условия равенства площадей под активной и осредненной эпюрами.
5. К верхнему слою элементов прикладываются осредненные напряжения, толщина верхнего слоя равна величине съема.
6. Закрепление корневого сечения и решение упругой задачи.
7. Выборка элементов и узлов объема пера без верхнего слоя, в результате решения осуществляется вывод данных по перемещениям центров тяжести сечений пера заготовки по трем основным осям.

Для количественной оценки деформаций лопаток на операциях ЭХО от остаточных напряжений использовались модели лопаток компрессора двигателя НК14СТ – лопатки статора компрессора (1,3,4,5,7,9,10,11,13 ступеней). Нагрузки в модели задавали эпюрами остаточных напряжений, наследуемыми в соответствии с технологическим процессом, используемым при производстве конкретной лопатки. В соответствии с разработанной методикой было проведено моделирование нагружения поверхностных слоев эпюрой остаточных напряжений и съема этого слоя на операции ЭХО.

В результате получено, что максимум деформаций пера расположен на входной и выходной кромках, построены зависимости деформаций входной и выходной кромок пера лопатки. Для удобства анализа результаты представлены в виде сводных зависимостей (рис 16) в относительных величинах. При анализе зависимостей видно, что они имеют сходный вид, на замковом и периферийном сечениях пера деформация равна нулю. Это можно объяснить способом закрепления заготовки лопатки при расчетах (ограничение математической модели) по втулочному и периферийному сечениям. Максимальные значения деформаций имеют входные и выходные кромки пера лопаток последних ступеней (9 - 15) в связи минимальными размерами толщины профиля пера. Эти лопатки более всего подвержены остаточным деформациям после ЭХО.

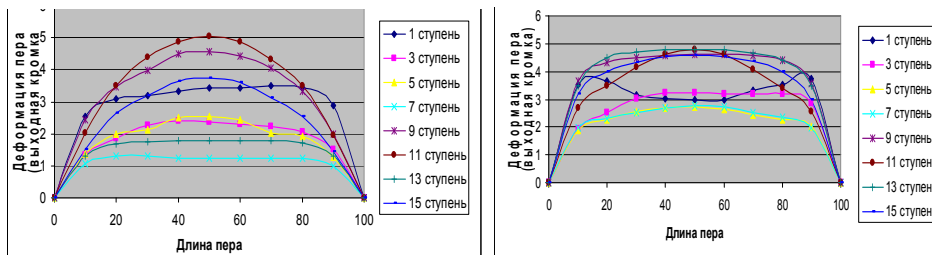


Рис. 16. Сводные зависимости деформаций по входной и выходной кромкам статорных лопаток

Разработанная методика может быть использована в качестве универсального инструмента при анализе вновь проектируемого технологического процесса, при назначении того или иного метода обработки пера с целью оценки ожидаемой деформации пера. Трудовые и временные затраты определения деформаций по данной методике почти на порядок ниже, чем по методу общего деформирования. Она быстро осваивается цеховыми технологами, имеющими навыки работы с ПК. Расхождение в результатах полученных значений деформаций по предлагаемой методике и по методу общего деформирования не превышает 4,8%.

В пятой главе решалась задача создания относительно простой и адекватной теоретической модели описания процесса объемного формообразования пера лопатки в условиях импульсной ЭХО.

Задача формообразования при ЭХО является сложной, так как должны учитываться взаимно влияющие сопряженные поля (электрические, гидродинамические, температурные и концентраций) с подвижными границами. Ее решение в общем виде даже для простейших случаев обработки невозможно, т.к., с одной стороны, недостаточно полно изучены происходящие при ЭХО явления, а с другой имеются с математические трудности расчета сопряженных трехмерных полей. Учитывая, что в реальных условиях производства технологический ток подается пакетами импульсов регулируемой длительности малой величины, а ЭИ остается неподвижным во время прохождения импульса, то малая величина импульса позволяет представить данный процесс в пределах действия импульса проходящим без изменения МЭЗ. Поэтому был принят ряд допущений:

- 1 – зазор полностью заполнен электролитом, закон Ома справедлив во всем объеме МЭЗ;
- 2 - процесс анодного растворения протекает с постоянным выходом металла по току η ($\eta = \text{const}$ в пределах действия импульса в расчетной точке);
- 3 - поляризация электродов постоянна по всей поверхности ($\varphi_A - \varphi_K = \text{const}$, в пределах действия импульса в расчетной точке);
- 4 - электропроводность электролита постоянна ($\chi = \text{const}$ в пределах действия импульса в расчетной точке).

При бесконечных плоскостях или в областях, достаточно удаленных от концов электродов, электрическое поле можно считать одномерным, т. е. электрический потенциал зависит только от одной переменной. Фасонные поверхности лопаток ГТД представляют собой сочетание цилиндрических, конических, сферических и прочих криволинейных

поверхностей. В каждом сечении были соединены соседние точки, заданные в рабочем чертеже, прямыми линиями и, таким образом, обрабатываемый профиль был разбит на простые геометрические элементы: горизонтальные, вертикальные, наклонные линейные образующие. Расчет МЭЗ, определение формы и размеров участков поверхности заготовки проводился отдельно для каждого геометрического элемента. Таким образом, формообразование поверхности пера было заменено совокупностью процессов ЭХО в расчетных точках.

После введения принятых допущений получено уравнение, описывающее формообразование поверхности в условиях импульсной ЭХО для конкретной расчетной точки и момента времени обработки:

$$y_a = \sqrt{y_0^2 + 2A\tau},$$

где y_a - величина МЭЗ после прохождения импульса;

y_0 - величина МЭЗ до прохождения импульса;

A - характеристика режима и обрабатываемого материала;

τ - длительность пакета импульсов.

Все изменения в межэлектродном зазоре при ЭХО учитываются заданием характеристики режима A , которая получается экспериментальным путем и корректируется в каждом конкретном шаге расчета.

На основе этого уравнения проведено математическое моделирование импульсной ЭХО, учитывающее все особенности этого процесса. В качестве расчетных точек принимаются точки, заданные в рабочем чертеже. Предложенная модель позволяет определить новые координаты профиля в расчетных точках после прохождения каждого пакета импульсов. Расчеты проводятся в следующей последовательности: перед прохождением пакета импульсов в каждой точке рассчитываем величину МЭЗ, по которому определяем характеристику режима A ; перед прохождением следующего пакета импульсов осуществляем расчет величины МЭЗ с учетом силового воздействия теплового и гидродинамического факторов. Известно, что одной из определяющих при обработке методом ЭХО пера лопатки является жесткость заготовки, которая, в свою очередь, уменьшается по мере съема припуска. В этой связи для учета изменения деформаций по перу в программу расчета вводятся величины коррекций (рассчитанные по методикам, разработанным в разделах 2 и 3) на величину термоупругих деформаций в зависимости от припуска и деформаций под действием силового воздействия потока электролита в виде таблиц точек. Учет коррекции осуществляется выбором соответствующих снятому припуску значений в каждой конкретной точке заготовки.

Деформации заготовок от остаточных напряжений проявят себя после окончания обработки и раскрепления заготовки. В работах ученых показано, что остаточные напряжения локализованы на глубине 0,2-0,5мм. Опыт показывает, что для удаления слоя с локализованными остаточными напряжениями необходимо удалить 2/3 снимаемого припуска. Характеристика режима A учитывает скорость растворения металла в зависимости от величины МЭЗ. Для расчетов по данной программе была разработана база данных по выбору характеристики режима A . Реализовано определение значения A для данной точки, соответствующего рассчитанному значению МЭЗ методом линейной интерполяции на основе предварительно полученной для конкретной пары сплав-электролит экспери-

ментальной зависимости $A=f(a)$.

Разработанная математическая модель описывает двухстороннюю обработку пера лопатки и позволяет определить координаты каждой точки профиля, заданной по чертежу, после импульсной ЭХО. При этом определяется погрешность толщины профиля в каждой точке, а также погрешности максимальной толщины и смещения профиля.

Для определения погрешности геометрических параметров и взаимного расположения пера лопатки при импульсной ЭХО разработана и отлажена программа расчета «АРМ технолога ЭХО». С ее помощью была произведена проверка полученной модели.

По разработанной методике, включающей моделирование основных факторов влияющих на точность, была разработана и отлажена технология ЭХО ступеней лопаток компрессора. Результаты показали высокую эффективность данной методики. Время обработки технологических процессов сократилось в два раза. Количество заготовок используемых при обработке технологии сократилось в три раза. Были исключены короткие замыкания между заготовкой и электродом, а также исключены прижоги в токоподводах.

Таким образом, можно сказать, что применение математической модели пространственного формообразования пера лопаток при импульсной ЭХО и решаемых на ее основе задач позволяет отказаться от проведения трудоемких экспериментов и снизить затраты и время обработки технологии импульсной ЭХО.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате комплекса теоретических и экспериментальных исследований решена научно-техническая проблема повышения эффективности ЭХО лопаток компрессора. При этом получены следующие результаты:

1. Разработана теоретико-экспериментальная модель формообразования пера лопатки при импульсной ЭХО, учитывающая основные особенности данного процесса и позволяющая определить изменение геометрии заготовки по всем заданным в рабочем чертеже точкам профиля.

2. Разработана методика определения деформации заготовок лопаток, возникающих на операции ЭХО под действием термоупругих напряжений, которые моделируются с использованием ПК ANSYS. Установлено, что величина и характер деформации пера в значительной мере зависят от геометрических характеристик лопаток – это площадь торцевых поверхностей замков, по которым осуществляется токоподвод, длина лопатки и площади профилей поперечного сечения пера, которые оказывают значительное влияние на жёсткость заготовки. Показано, что максимальные деформации на лопатках ротора компрессора наблюдаются на входной и выходной кромках, и локализованы на расстоянии 15-20% от длины лопатки ближе к периферийным сечениям. Устранены прижоги по входной и выходной кромкам за счет решения термоупругой задачи и оптимизации плотности тока.

3. Разработана методика определения деформации деталей, возникающих на операции импульсной ЭХО под действием гидравлических сил, которые моделируются с использованием ПК FLUENT и ПК ANSYS. Установлено влияние гидродинамических сил со стороны потока электролита на точность операции ЭХО при влиянии различных

параметров. Устранены застойные зоны и КЗ за счет изменения гидродинамики потока электролита.

4. Разработана методика определения деформации деталей при удалении напряженных слоев на операции импульсной ЭХО с использованием осредненных эпюр остаточных напряжений и ПК ANSYS. Установлено влияние структуры технологического процесса на распределение остаточных напряжений в пере лопаток ГТД после ЭХО. Было установлено, что максимум деформации, получаемый при снятии припуска на операции ЭХО, под действием остаточных напряжений локализован на входной и выходной кромках, за счет чего было снижено количество брака по точности обработки лопаток на операциях ЭХО под действием остаточных напряжений.

5. Разработана методика проектирования окончательной обработки лопатки с применением окончательной однократной электрохимической обработки пера с учетом деформаций пера, вызванных нагревом, силовым воздействием гидравлических сил, а также деформациями от остаточных напряжений.

6. Для практического проектирования технологии ЭХО разработан и внедрен в производство программный комплекс «АРМ технолога ЭХО», который позволил: снизить затраты и время на подготовку производства технологии ЭХО, повысить эффективность ТП за счет качества отработки ТП.

7. Оптимизирована конструкция оснастки за счет ее объемного моделирования, что позволило исключить доработку технологической оснастки.

Основные положения и научные результаты диссертации изложены в следующих основных работах:

1. Смелов, В.Г. Проектирование технологии изготовления лопаток компрессора газотурбинных двигателей с помощью компьютерного моделирования поэтапных состояний пера (тезисы)/ В.Г. Смелов, Г.В. Смирнов, Н.Д. Проничев. //Сб. тез. докладов ВНТК "Новые материалы и технологии НМТ-2002". М., 2002.
2. Смелов, В.Г. Математическое моделирование процесса электрохимической обработки(тезисы)/ В.Г. Смелов, Г.В. Смирнов // Тез. Док. междунар. науч.-техн. Конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения».- Самара СГАУ, 2003.
3. Смелов, В.Г. Математическое моделирование процесса электрохимической обработки(статья)/ В.Г. Смелов, Г.В. Смирнов// Вестн. СГАУ Серия «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». ч1. - Самара СГАУ, 2003.
4. Смелов, В.Г. Моделирование остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопатки и расчет деформации пера лопатки после снятия слоя с остаточными напряжениями(статья)/ В.Г. Смелов, Г.В. Смирнов, А.М. Курушин// Вестн. СГАУ Серия «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Ч2. - Самара СГАУ, 2003.
5. Смелов, В.Г., Моделирование остаточных напряжений и процесса ЭХО заготовок./ В.Г. Смелов, Г.В. Смирнов// Сб. тез. докл. ВНК «VII- Королевские чтения», Самара: 2003, С 86-87.
6. Смелов, В.Г. Пути параметризации лопаток ГТД для использования CAD/CAM/CAE пакетах (статья)/ В.Г. Смелов, К.А. Тарасов // Вестн. СГАУ Се-

- рия «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Ч2. - Самара СГАУ, 2004
7. Смелов, В.Г. Создание базы данных для электрохимической обработки с целью оптимизации процесса выбора электролита(статья)/ В.Г. Смелов, Г.В. Смирнов, Т.В. Ерофеева // Вестн. СГАУ Серия «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Ч2. - Самара СГАУ, 2004
 8. Смелов, В.Г. Основные механизмы генерации дестабилизирующих факторов в камере электрохимической обработки изделий авиационной техники./ Н.И. Лиманова // Материалы ВНТК «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций».- Самара: СГАУ, 2006. -174 с.
 9. Смелов, В.Г. Моделирование электронного документооборота при производстве лопаток ГТД в PDM системах/ В.Г. Смелов, Ю.М. Алексеева, Н.Д. Проничев //МНТК «Проблемы и перспективы развития двигателестроения».- Самара: СГАУ, 2006/ -34 с.
 10. Смелов, В.Г. Моделирование течения электролита в межэлектродном зазоре при электрохимической обработке лопаток компрессора с использованием метода конечных элементов во «Fluent»/ В.Г. Смелов, Г.В. Смирнов, Н.Д. Проничев// труды МНТК «Проблемы и перспективы развития двигателестроения».- Самара: СГАУ, 2006. -50-51 с.
 11. Смелов, В.Г., Моделирование термоупругих деформаций при электрохимической обработке лопаток компрессора с помощью метода конечных элементов в Ansys/ В.Г. Смелов, Г.В. Смирнов, Н.Д. Проничев// труды МНТК «Проблемы и перспективы развития двигателестроения».- Самара: СГАУ, 2006. -51-53 с.
 12. Смелов, В.Г., Моделирование остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопатки и расчет деформации пера лопатки после снятия слоя с остаточными напряжениями. Проблемы и перспективы развития двигателестроения/ В.Г. Смелов, Г.В. Смирнов, М.В. Демин// труды МНТК «Проблемы и перспективы развития двигателестроения».- Самара: СГАУ, 2006. -53-54 с.
 13. Смелов, В.Г. Создание методики моделирования остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопатки и расчет деформации пера лопатки после снятия слоя с остаточными напряжениями/ В.Г. Смелов, Г.В. Смирнов, М.В. Демин// Вестн. СГАУ. Вып. 2(10) Ч.1 и 2.- Самара, 2006. -94-98 с.
 14. Смелов, В.Г. Использование моделей высокого уровня для исследования закономерностей течения электролита при электрохимической обработке/ В.Г. Смелов, Г.В. Смирнов, Н.Д. Проничев // Вестн. СГАУ. Вып. 2(10) Ч.1 и 2.- Самара, 2006. -99-103с.
 15. Смелов, В.Г. Создание методики моделирования термоупругих деформаций при электрохимической обработке лопаток компрессора с помощью метода конечных элементов/ В.Г. Смелов, Г.В. Смирнов, Н.Д. Проничев // Вестн. СГАУ. Вып. 2(10) Ч.1 и 2.- Самара, 2006. -104-108с.
 16. Шитарев, И.Л. Смирнов Г.В., Смелов В.Г. Математическое моделирование процесса электрохимической обработки методом конечных элементов/И.Л. Шитарев, В.Г. Смелов, Г.В. Смирнов// Материалы 5-й Международной конф. «Авиация и космонавтика» М., 2006. -314 с.

17. Компьютерное моделирование операций технологического процесса изготовления деталей ГТД : метод. указания / Сост.: Н.Д. Проничев, Е.А. Рамзаева, В.Г. Смелов, и др. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 140 с.
18. Математическое моделирование процесса ЭХО лопаток ГТД : метод. указания / Сост.: Л.А Анипченко., В.Н Бородин, В.Г. Смелов, и др.– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 47 с.

Подписано в печать 24.08.07
Формат 60×84 1/16
Отпечатано с готовых оригинал макетов
Тираж 100 экз.